

Семёнова О.Ю., Прохоров А.А., Михалкина С.А., Сазанов В.В., Патрикеев И.А.

**О ВЛИЯНИИ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
СЖИМАЮЩИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ**

В настоящем исследовании рассматривается пример использования математического моделирования первоначальных деформаций в виде алгебраических функций $f(\xi)$ при назначении геометрических параметров образцов-свидетелей в технологических процессах поверхностного упрочнения деталей типа полых цилиндрических валов и прогнозировании приращения предела выносливости [1-3]. Применение такого моделирования обеспечивает практически все возможные случаи характера изменения остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое деталей. Алгебраические выражения различных функций (вариантов) распределения первоначальных деформаций $f(\xi)$ приведены в табл. 1, а их графики – на рис.1.

Таблица 1 – Варианты распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого поверхностного слоя деталей.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f(\xi)$	$1 - \sqrt{1 - \xi^2}$	ξ^2	ξ	$1 - (1 - \xi)^2$	$2\xi\sqrt{1 - \xi^2}$	$(1 - \xi)^2$	$1 - \xi^2$	$1 - \xi$	$\sqrt{1 - \xi^2}$

Выражение для первоначальных деформаций записывается в виде

$$\varepsilon(\xi) = \varepsilon_0 f(\xi), \quad (1)$$

где ε_0 – постоянная величина деформации; $\xi = y/a$ – расстояние от поверхности гладкой детали до текущего слоя, выраженное в долях от толщины a упрочнённого слоя (рис. 2); ξ изменяется в пределах от 0 до 1.

Варианты 1–5 распределения первоначальных деформаций (рис.1 и табл.1) соответствуют обработке деталей поверхностным пластическим деформированием с интенсивными режимами упрочнения и обработке деталей из материалов с низкой температуропроводностью, когда наблюдается спад сжимающих остаточных напряжений к поверхности, то есть имеет место случай подповерхностного максимума напряжений. Такие эпюры остаточных напряжений реализуются, например, при обкатке роликом с большими усилиями накатывания.

Упрочнение деталей на более «мягких» режимах, а также упрочнение деталей из материалов с высокой температуропроводностью приводит к распределению остаточных

напряжений по вариантам 6-9, когда максимум напряжений находится на поверхности детали.

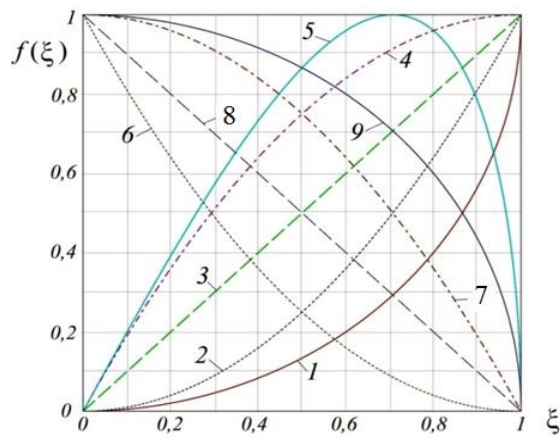


Рис. 1. Графики функции $f(\xi)$: номера кривых соответствуют вариантам табл. 1

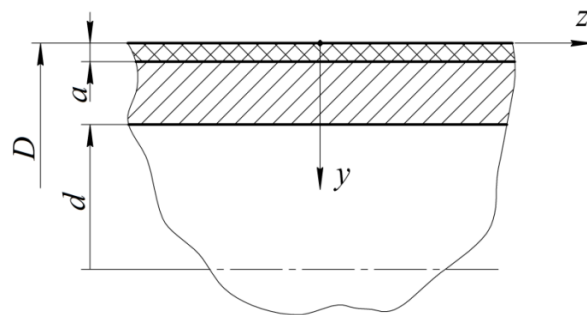
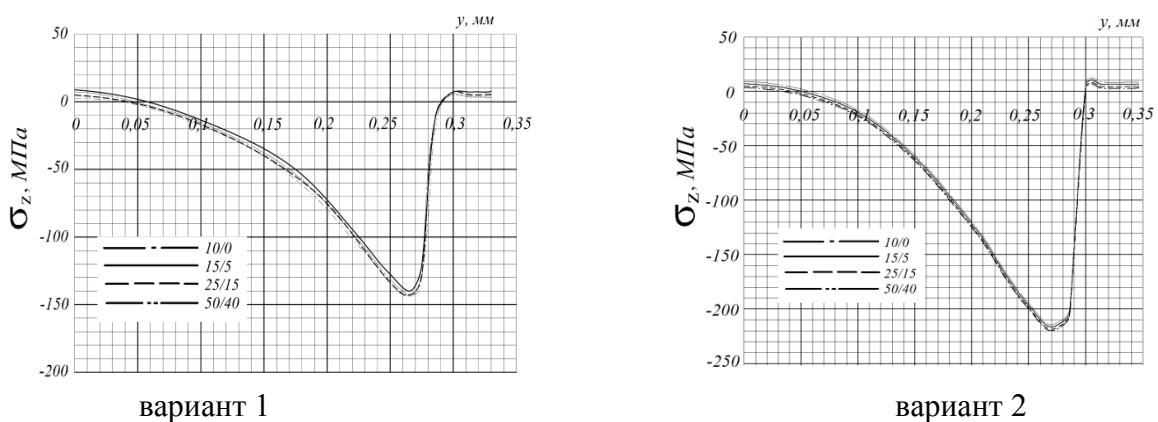


Рис. 2. Размеры полый цилиндрической детали

Пример результатов расчёта осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя y при различных значениях D/d для вариантов 1-2 приведены на рис. 3.



вариант 1
вариант 2
Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения для различных вариантов (табл. 1) распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого поверхностного слоя деталей различного типоразмера

На основании проведённых в работе [2] исследований были сделаны выводы о том, что для полых цилиндрических деталей с надрезом дополнительные остаточные напряжения, вызванные опережающим поверхностным пластическим деформированием, определяются толщиной стенки и не зависят от диаметра. Эти напряжения равны остаточным напряжениям сплошной детали, диаметр которой равен удвоенной толщине стенки полый детали.

Исходя из данных выводов и предположения о том, что при технологическом процессе упрочнения все детали получают одинаковые первоначальные деформации, в качестве образца-свидетеля для полых цилиндрических деталей может использоваться сплошной цилиндр из того же материала с диаметром, равным удвоенной толщине стенки полый детали.

Необходимый объём расчётов был выполнен методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN на цилиндрических деталях с размерами: $D/d = 10/0$ мм/мм, $15/5$ мм/мм, $25/15$ мм/мм, $50/40$ мм/мм, где D – наружный диаметр и d – внутренний диаметр (рис.2). В качестве образца-свидетеля в данной партии использовалась сплошная цилиндрическая деталь диаметром 10 мм, а остальные полые детали имели одинаковую толщину стенки, равную 5 мм.

Далее при помощи МКЭ-пакета ANSYS для сплошной цилиндрической детали $D = 10$ мм с полем остаточных напряжений были определены закономерности изменения коэффициента интенсивности напряжений K_I (индекс I обозначает тип разрушения – отрыв) с увеличением глубины усталостной трещины (рис. 4.). Остаточные напряжения в конечно-элементную модель были введены при помощи метода термоупругости [3]. Толщина упрочнённого слоя принималась равной 0,5 мм и отсчитывалась от дна концентратора, первоначальная деформация $\varepsilon_0 = 0,001$, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Полукруглый надрез с радиусом $R = 0,5$ мм наносился после операции упрочнения.

Рассматривались первые четыре варианта (табл. 1) распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого поверхностного слоя деталей.

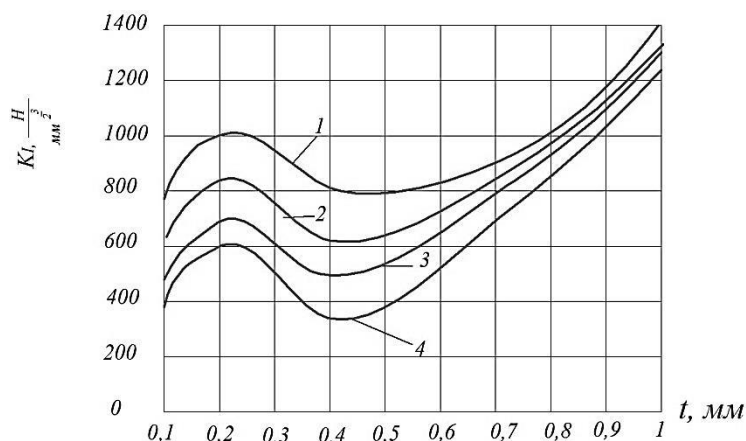


Рис.4. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины в деталях диаметром $D = 10$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм

Из рис. 4 следует, что характер изменения K_I при увеличении глубины трещины t не зависит от вида распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя, а меняется лишь уровень зависимости $K_I(t)$. Эту закономерность следует учитывать при выборе оптимальных по сопротивлению усталости видов и режимов поверхностного упрочнения деталей.

Резкое возрастание и падение КИН на определённой глубине свидетельствует о том, что трещина в детали, в поверхностном слое которой действуют сжимающие остаточные напряжения, достигнув этой глубины, может остановиться и станет нераспространяющейся.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
2. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.
3. Сазанов, В.П. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочнённых деталях при выборе образца-свидетеля [Текст] / В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 3(63). – С. 1-7.